

# 神经网络分析梅尼埃病患者的宽频声导抗特点

吴妍<sup>1</sup> 何白慧<sup>1</sup> 沈敏<sup>1</sup> 杨艳<sup>2</sup> 金玉莲<sup>1</sup> 张青<sup>1</sup> 杨军<sup>1</sup> 李姝娜<sup>1</sup>

**[摘要]** **目的:**基于神经网络构建宽频声导抗对梅尼埃病的预测模型,并评价其预测性能。**方法:**纳入 64 例确诊梅尼埃病患者,内耳钆增强磁共振造影均提示患耳膜迷路积水,同时选取 40 例正常青年人作为对照。分析梅尼埃病患者和正常青年人的宽频声导抗测试结果,采用 MATLAB 2021a 软件建立神经网络模型,通过准确率、阳性预测值、阴性预测值、约登指数、灵敏度、特异度、受试者工作特征曲线及曲线下面积(AUC)评估模型的性能。**结果:**成功建立了用宽频声导抗预测梅尼埃病的单隐层前馈神经网络模型,其输入层有 104 个特征值,隐层有 13 个神经元节点,输出层有 1 个输出神经元。该模型准确率 83.2%,阳性预测值为 80.7%,阴性预测值为 84.3%,灵敏度为 76.5%,特异度为 83.7%,约登指数为 0.602,模型 AUC 为 0.855。**结论:**基于神经网络,根据宽频声导抗测试结果构建了准确率较高的梅尼埃病预测模型,为诊断梅尼埃病提供了参考。

**[关键词]** 梅尼埃病;膜迷路积水;宽频声导抗;声吸收率;神经网络

**DOI:**10.13201/j.issn.2096-7993.2022.09.007

**[中图分类号]** R764.33 **[文献标志码]** A

## Characteristics of wideband tympanometry in patients with Ménière's disease based on neural network

WU Yan<sup>1</sup> HE Baihui<sup>1</sup> SHEN Min<sup>1</sup> YANG Yan<sup>2</sup> JIN Yulian<sup>1</sup>  
ZHANG Qing<sup>1</sup> YANG Jun<sup>1</sup> LI Shuna<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Otorhinolaryngology-Head & Neck Surgery, Xinhua Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine; Shanghai Jiaotong University School of Medicine Ear Institute; Shanghai Key Laboratory of Translational Medicine on Ear and Nose diseases, Shanghai, 200092, China; <sup>2</sup>Liaoning Medical Instrument Inspection and Testing Institute)

Corresponding author: LI Shuna, E-mail: lishuna@xinhumed.com.cn

**Abstract Objective:** To construct a prediction model for Ménière's disease based on neural network and evaluate its prediction ability. **Methods:** Sixty-four patients with Ménière's disease underwent gadolinium enhanced magnetic resonance imaging of inner ear which showed endolymphatic hydrops. Meanwhile, 40 healthy adults were enrolled as controls. The database of wideband tympanometry of patients and control subjects was analyzed, and the neural network model was established by MATLAB 2021a software. The prediction ability of the model was evaluated by accuracy, positive predictive value, negative predictive value, the Youden index, sensitivity, specificity, receiver operating characteristic curve and area under curve (AUC). **Results:** A feedforward network model was built with a single hidden layer to predict Ménière's disease with wideband tympanometry. There were 104 features in the input layer, 13 neuron nodes in the hidden layer and 1 output neuron in the output layer. The accuracy of the model was 83.2%, the positive predictive value was 80.7%, the negative predictive value was 84.3%, the sensitivity was 76.5%, the specificity was 83.7%, the Youden index was 0.602, and the AUC was 0.855. **Conclusion:** Based on neural network, the prediction model of Ménière's disease with high accuracy was constructed according to the results of wideband tympanometry, which provided reference for the diagnose of Ménière's disease.

**Key words** Ménière's disease; endolymphatic hydrops; wideband tympanometry; acoustic absorbance; neural network

梅尼埃病是一种特发性膜迷路积水的内耳病,表现为反复发作的旋转性眩晕,波动性感音神经性听力损失,耳鸣和(或)耳胀满感,发病率为 50/

10 万~200/10 万,给患者带来了较重的生活负担<sup>[1]</sup>。梅尼埃病的临床表现是诊断的主要依据,其他检查如耳蜗电图<sup>[2]</sup>、甘油试验、冷热试验、前庭诱发肌源性电位<sup>[3]</sup>、内耳钆增强磁共振造影<sup>[4-5]</sup>可用于辅助诊断,但均有一定的局限性。近年来宽频声导抗作为一种新型听力学测试技术,获得了研究者的关注,但是目前宽频声导抗对于梅尼埃病的诊断

<sup>1</sup>上海交通大学医学院附属新华医院耳鼻咽喉-头颈外科  
上海交通大学医学院耳科学研究所 上海耳鼻咽喉疾病转化医学重点实验室(上海,200092)

<sup>2</sup>辽宁省医疗器械检验检测院  
通信作者:李姝娜,E-mail:lishuna@xinhumed.com.cn

引用本文:吴妍,何白慧,沈敏,等.神经网络分析梅尼埃病患者的宽频声导抗特点[J].临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2022,36(9):685-690. DOI:10.13201/j.issn.2096-7993.2022.09.007.

价值尚存在争议<sup>[6-7]</sup>。数据挖掘已被广泛运用到医学领域<sup>[8-9]</sup>，而神经网络是常见的数据挖掘方法之一，在疾病诊断和转归预测等方面具有良好的应用价值<sup>[10]</sup>。本研究将神经网络方法应用于宽频声导抗测试对梅尼埃病的预测中，旨在探索宽频声导抗对于梅尼埃病诊断的价值，以期为梅尼埃病的诊断提供便捷有效的方法。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

回顾性分析 2019 年 12 月—2021 年 12 月就诊于上海交通大学附属新华医院耳鼻咽喉-头颈外科且符合入选标准的梅尼埃病确诊患者 64 例。

纳入标准：①符合《梅尼埃病诊断和治疗指南(2017)》<sup>[11]</sup>中的临床诊断标准；②内耳钆增强磁共振造影提示患耳膜迷路积水；③无外、中耳相关疾病；④无引起膜迷路积水的其他内耳疾病。

64 例患者中，男 27 例，女 37 例；年龄 22~79 岁，平均(54.64±12.16)岁；单侧 58 例，双侧 6 例。入组患者均于门诊就诊时或住院前的非急性发作期完成纯音测听、宽频声导抗测试、内耳钆增强磁共振造影。1 例患耳数据在宽频声导抗数据输出过程中丢失，因此本研究只保留了 69 例患耳数据，其中听力分期 I 期 6 耳(8.70%)，II 期 9 耳(13.04%)，III 期 43 耳(62.32%)，IV 期 11 耳(15.94%)。单侧梅尼埃病患者的健侧听力及前庭功能检查均未见明显异常，且内耳钆增强磁共振造影未见膜迷路积水。

另选取健康青年人 40 例作为对照，其性别、年龄与入组梅尼埃病患者间无显著差异。对照组纯音测听平均听阈低于 20 dB HL，无外、中及内耳疾病，并接受宽频声导抗测试，未接受内耳钆增强磁共振造影检查。

### 1.2 研究方法

听力学测试：①纯音测听：由经验丰富的听力师使用纯音听力计(Astera, 丹麦)在隔声室中完成测试，测试频率范围为 250~8000 Hz。②内耳钆增强磁共振造影：患者取仰卧位，双侧鼓室分别注射用生理盐水稀释 8 倍的钆喷葡胺注射液 0.5 mL，于 24 h 后进行核磁共振检查。③宽频声导抗：采用丹麦国际听力公司 TITAN 设备，其刺激频率范围为 226~8000 Hz(共 107 个频率点)，测试过程中起始压力为 +138 daPa，终止压力为 -282 daPa，并获得声吸收率最大值、最大声吸收率对应频率、共振频率、峰压值及不同频率和不同声压下声吸收率的数值。

### 1.3 建模方法

本研究使用 Python 编程语言在声导抗仪输出文件(文件类型为 .m 或 .xml)中提取相关原始数据共 205 例，并按照下述流程图进行建模(图 1)。

由于宽频声导抗数据输出过程中丢失了 1 例患耳数据、1 例健耳数据和 1 例对照组健耳数据，提取出的原始数据包括 69 例患耳、57 例健耳及对照组 79 例健耳。

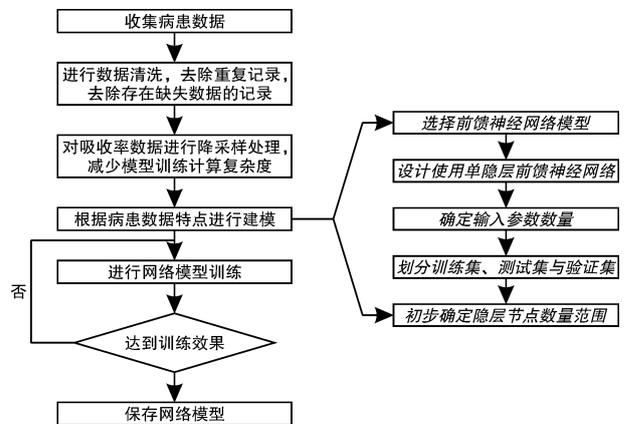


图 1 建模流程图

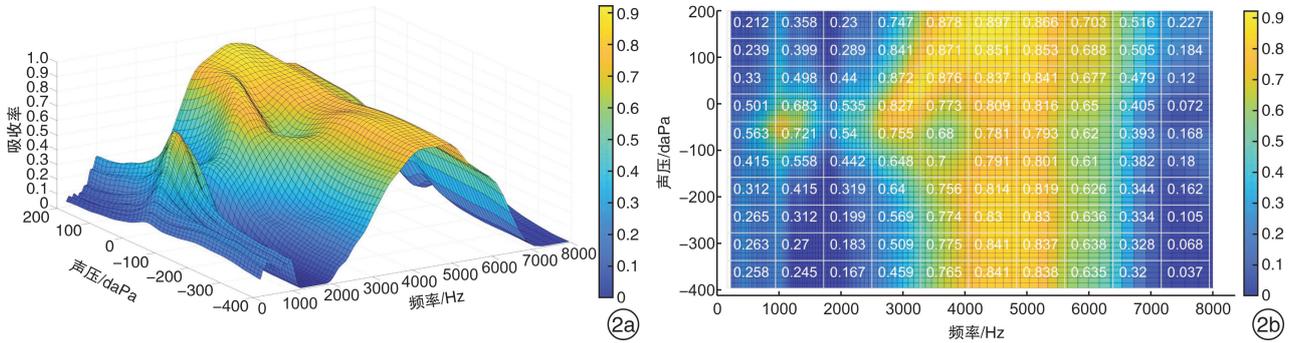
首先，进行数据清洗。删除重复、关键数据缺失和数据明显异常的记录共 8 例，最终保留 197 耳的数据进行分析，其中包括有梅尼埃病症状且存在膜迷路积水的患耳 68 例，无梅尼埃病症状的健耳 129 例。

第二，进行数据预处理。将结果整理为二分类变量，内耳钆增强磁共振造影显示内耳膜迷路积水赋值为“1”，无膜迷路积水和对照组赋值为“0”。由于不同频率和声压下对应的吸收率所形成的数据矩阵过于庞大，本研究将声吸收率投影至一个二维平面，并划分成 10×10 的矩阵(图 2)，用落入 10×10 矩阵中的每一个区域的最大吸收率作为该区域的吸收率。这样就通过降低声吸收率在频率和声压方面的采样率，将每组中 2704 个原始吸收率数据降采样至 100 个数据，从而达到对样本进行特征降维的目标，大大降低了网络训练的数据量(图 3)。

第三，创建神经网络。使用 MATLAB 2021a 软件中的 nprtool 工具导入数据清洗后的数据集，此数据集包含 197 个观测值，每个观测值有 104 个特征值，包括宽频声导抗的声吸收率最大值、最大声吸收率对应频率、共振频率、峰压值及降维后的声吸收率 x00~x99。该数据集按照 0.7 : 0.15 : 0.15 的比例自动随机拆分为训练集、验证集和测试集，使用训练集进行训练，使用验证集进行参数筛选优化，使用测试集进行效果评估，nprtool 工具未使用交叉验证方法。选择神经网络中的前馈神经网络模型，创建一个具有单隐层的前馈神经网络，该网络包括输入层、隐层和输出层三部分。各隐层神经元节点使用 sigmoid 作为激活函数，输出层使用 softmax 激活函数。根据经验选择隐层内

初始神经元节点的数量范围为 8~25。输出神经元的数量设置为 1,表示将相应的数据输入网络

时,该输出神经元将生成对于是否患有梅尼埃病的预测结果(图 4)。



2a:为某例内耳耳增强磁共振造影阳性耳的声吸收率 3D 鼓室图,x 轴、y 轴和 z 轴分别为频率(Hz)、声压(daPa)和声吸收率;2b:为图 2a 进行投影和降采样赋值后的 2D 图,图 2b 被划分为 10×10 的矩阵,每个局部区域内取一个声吸收率最大值,从而实现声吸收率在频率和声压方面的降采样;x 轴和 y 轴分别为频率(Hz)和声压(daPa),颜色条从黄到蓝表示声吸收率从大到小的对应数值。

图 2 降采样示意图

pres	press	freq	freqs
[-282,-240]	0	[226,800]	0
[-240,-198]	1	(800,1600]	1
[-198,-156]	2	(1600,2400]	2
[-156,-114]	3	(2400,3200]	3
[-114,-72]	4	(3200,4000]	4
[-72,-30]	5	(4000,4800]	5
[-30,12]	6	(4800,5600]	6
[12,54]	7	(5600,6400]	7
[54,96]	8	(6400,7200]	8
[96,138]	9	(7200,8000]	9

pres	freq
x00	0
x01	0
...	
x10	1
...	
x99	9

press=(pres+282)/42      freqs=(freq-1)/800

pres 和 freq 表示宽频声导抗仪器检测数据声压和频率的范围。将声压和频率范围划分为 10 等分,并用 press 和 freqs 分别表示降采样赋值后的声压和频率,用 x00~x99 表示各数据区域内的声吸收率最大值。

图 3 降采样方案

LAB2021a 的 nprtool 工具进行网络训练,并保存训练后的模型。

### 2 结果

#### 2.1 神经网络模型的参数确定

以 104 个宽频声导抗相关的特征值作为输入层(Input)构建单隐层前馈神经网络模型(图 5)。经过训练后,获得隐层(Hidden)神经元节点数量为 13 的神经网络模型。

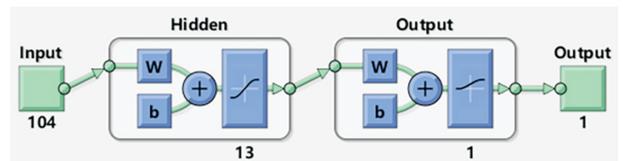


图 5 神经网络模型示意图

#### 2.2 神经网络模型的性能评估

使用训练所得网络模型,将数据集输入神经网络模型进行预测,并与真实值进行比较。该模型准确率为 83.2%,阳性预测值为 80.7%,阴性预测值为 84.3%。根据模型绘制出相应的受试者工作特征(receiver operating characteristic curve, ROC)曲线(图 6),并对训练后的神经网络模型优劣进行判断。此 ROC 曲线的约登指数最大值为 0.602,取该点为最佳截点得出灵敏度为 76.5%,特异度为 83.7%,ROC 曲线下面积为 0.855。

### 3 讨论

根据目前的诊断标准,梅尼埃病是一种依据患者症状诊断的内耳疾病,主观性较强,易受患者表述的影响,也容易受到其他引起眩晕的疾病干扰,存在误诊和漏诊的风险。

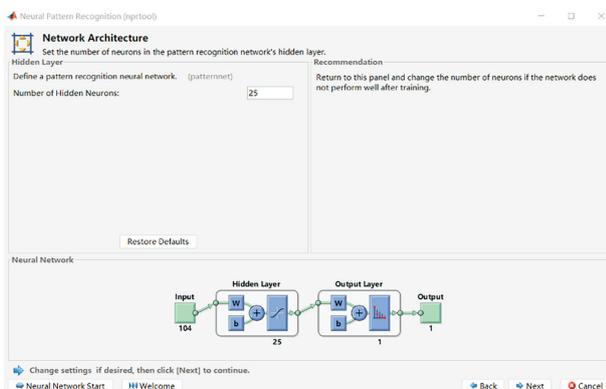


图 4 网络模型产生过程

为网络模型产生过程界面,输入不同隐层神经元节点数量,对神经网络进行训练,并在其中选取最优网络模型。

第四,设定隐层神经元节点数量,使用 MAT-

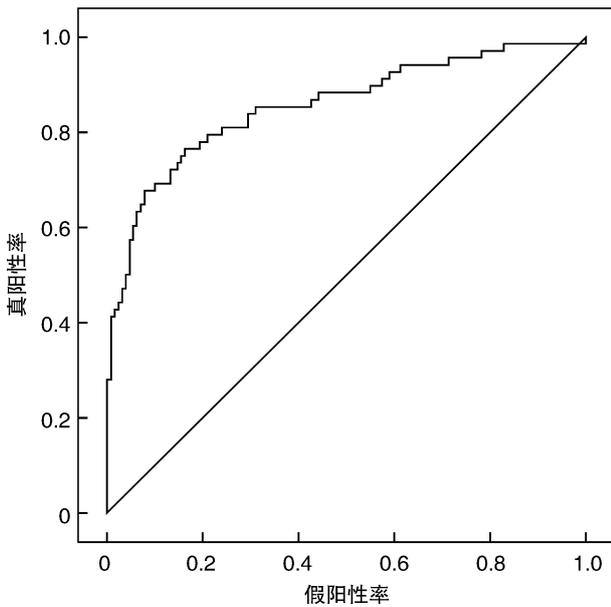


图 6 神经网络模型的 ROC 曲线

梅尼埃病的主要病理表现为膜迷路积水,目前临床上用于判断内耳膜迷路积水的检查方法主要包括内耳钆增强磁共振造影<sup>[12]</sup>和耳蜗电图<sup>[13-14]</sup>。内耳钆增强磁共振造影不仅对软组织的分辨能力较好,能够有效地证实活体膜迷路积水的存在,而且有助于发现症状不典型的梅尼埃病。Foster等<sup>[15]</sup>对 53 篇文献进行荟萃分析发现,276 例符合 1995 年梅尼埃病诊断标准的患者很可能存在至少单侧耳的膜迷路积水。但内耳钆增强磁共振造影费用高、时间长、存在禁忌证<sup>[16]</sup>、可能出现不良反应,且部分患者圆窗膜对于造影剂的通透性较差,缺少统一诊断标准,因此临床应用受到限制。许珉等<sup>[17]</sup>以 64 例符合《梅尼埃病诊断和治疗指南(2017)》<sup>[11]</sup>的单侧梅尼埃病患者作为研究对象,以 127 例非梅尼埃病的眩晕患者作为对照,分析并指出耳蜗电图灵敏度约为 65%、特异度约为 78%,对于梅尼埃病的诊断价值高于单个前庭功能检查(cVEMP、oVEMP 和冷热试验),但仍需结合病史和其他听力前庭功能检查综合诊断。因此在临床上需要更快捷、经济、有效的无创检查来辅助梅尼埃病的诊断。

宽频声导抗测试采用 250~8000 Hz 频率范围内的探测音,瞬时刺激中存在多个频率,不易受到源自患者运动的肌源性噪声的影响,与只有单一频率探测音的传统声导抗相比能获得更丰富可靠的信息。宽频声导抗已在耳硬化症<sup>[18-19]</sup>、分泌性中耳炎<sup>[20-21]</sup>、上半规管裂<sup>[22-23]</sup>等疾病的筛查和预测中得到研究,在梅尼埃病患者中也有一定的特异性表现。由于梅尼埃病患者存在膜迷路积水,患侧内耳压力增加,镫骨底板处机械阻抗相应降低,进而影响宽频声导抗的测试结果。李姝娜等<sup>[24]</sup>研究发

现,符合临床诊断标准的单侧梅尼埃病患者双耳间吸收率面积有明显差异。兰兰等<sup>[25]</sup>发现单侧梅尼埃病患者症状耳的共振频率和双峰起始频率值均低于非症状耳。Demir 等<sup>[26]</sup>对 4 个频率点(0.25、0.5、0.75、1 kHz)对应的吸收率分别进行 ROC 分析,得到 0.75 kHz 时敏感性最高(81%),1 kHz 时特异性最高(66.7%),可用于诊断梅尼埃病的补充测试。刘洁等<sup>[27]</sup>纳入 52 例单侧梅尼埃病患者分析后得到,梅尼埃病患者患耳的宽频声能吸收率在 1587~4000 Hz 处显著低于对照组。Tanno 等<sup>[28]</sup>对 9 只梅尼埃病症状耳、21 只非症状耳和 30 只对照耳进行比较发现,有症状组的峰压值显著高于其他两组,对照组在环境压力和峰压下的低频吸收率高于其他两组。综上所述,宽频声导抗的指标可以提示梅尼埃病,可能是一种简单实用的非侵入性辅助诊断工具。由于相关研究大多只涉及了宽频声导抗的单个指标<sup>[6]</sup>,本研究拟进一步发掘宽频声导抗对于梅尼埃病诊断的潜力。

近年来,已有一些学者将数据挖掘应用于梅尼埃病的诊断中。Kentala 等<sup>[29]</sup>基于临床症状,使用决策树方法进行眩晕相关疾病的鉴别诊断,梅尼埃病诊断的准确率达到 94%。但该模型完全依赖临床症状,无法排除患者的阐述和记忆等主观因素对于模型准确率的影响。Cho 等<sup>[30]</sup>依据 124 名受试者的核磁共振数据,开发了一种基于卷积神经网络的深度学习模型,用于自动计算静脉钆增强磁共振造影的内淋巴积水比率。本研究的优势在于对诸多学者关注的指标,如声吸收率最大值、声吸收率最大值对应的频率、共振频率、峰压、所有频率和声压对应的所有声吸收率,进行了全面分析,并结合数据挖掘,建立梅尼埃病的神经网络模型。与基于临床症状的模型相比,本模型以宽频声导抗测试结果为基础,具有更强的客观性,并且宽频声导抗是一项简单易行的检查,有利于在症状尚不典型的病程早期对是否患有梅尼埃病进行预测。

综上所述,本研究构建的神经网络模型,输入宽频声导抗的声吸收率最大值、最大声吸收率对应的频率、共振频率、峰压值及降维后的声吸收率,对梅尼埃病诊断的灵敏度为 76.5%,特异度为 83.7%,综合灵敏度和特异度两个指标,优于现有其他研究对宽频声导抗用于梅尼埃病辅助诊断的效能。有利于早期对可疑患者进行健康教育<sup>[31-32]</sup>和病程追踪<sup>[33]</sup>,对指导临床诊断和治疗、改善患者生存质量具有较大的现实意义。

本研究仍存在一些不足之处。①本研究局限于单中心,且由于部分患者依从性欠佳及宽频声导抗数据采集、保存、传输等过程中产生的数据丢失及异常,删除了部分记录,数据量不够丰富。②本模型仅采用宽频声导抗相关指标作为输入量。梅

尼埃病分期也是预测的可能影响因素,但由于各分期病患数据过少,无法训练出有效的神经网络模型,因此暂未考虑分期对于模型的影响。③为提高梅尼埃病诊断的准确性,本研究入组患者不仅满足《梅尼埃病诊断和治疗指南(2017)》<sup>[11]</sup>中的临床诊断标准,还需明确患耳存在内淋巴积水。未来我们将通过收集多中心样本及纳入更多特征以扩大数据库,使用更优质的网络结构,构建更完善的模型,提升对梅尼埃病的预测能力,并最终应用于临床中。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Basura GJ, Adams ME, Monfared A, et al. Clinical Practice Guideline: Ménière's Disease[J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2020, 162(2\_suppl): S1-S55.
- [2] 何白慧,张帆,孙夏雨,等. 外耳道耳蜗电图对梅尼埃病患者的诊断价值[J]. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2020, 34(5): 20-26.
- [3] Rizk HG, Liu YF, Strange CC, et al. Predictive Value of Vestibular Evoked Myogenic Potentials in the Diagnosis of Ménière's Disease and Vestibular Migraine[J]. *Otol Neurotol*, 2020, 41(6): 828-835.
- [4] 阿布利克木·依明,米日喀米力·玉苏甫,曲源,等. 经静脉内耳钆造影对疑似梅尼埃病的临床诊断价值[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2022, 28(2): 8-12.
- [5] Cho YS, Ahn JM, Choi JE, et al. Usefulness of Intravenous Gadolinium Inner Ear MR Imaging in Diagnosis of Ménière's Disease[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 17562.
- [6] Meng X, Zhu K, Yue J, et al. The Role of Wideband Tympanometry in the Diagnosis of Meniere's Disease[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 808921.
- [7] Mieke J, Mogensen S, Lyhne N, et al. Wideband tympanometry as a diagnostic tool for Meniere's disease: a retrospective case-control study[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2022, 279(4): 1831-1841.
- [8] Xiao W, Jing L, Xu Y, et al. Different Data Mining Approaches Based Medical Text Data[J]. *J Healthc Eng*, 2021, 2021: 1285167.
- [9] Saberi-Karimian M, Khorasanchi Z, Ghazizadeh H, et al. Potential value and impact of data mining and machine learning in clinical diagnostics[J]. *Crit Rev Clin Lab Sci*, 2021, 58(4): 275-296.
- [10] Sheikhtaheri A, Sadoughi F, Hashemi Dehaghi Z. Developing and using expert systems and neural networks in medicine: a review on benefits and challenges[J]. *J Med Syst*, 2014, 38(9): 110.
- [11] 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志编辑委员会,中华医学会耳鼻咽喉头颈外科学分会. 梅尼埃病诊断和治疗指南(2017)[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2017, 52(3): 167-172.
- [12] 刘宇鹏,杨军,贾欢,等. 应用内耳钆增强磁共振观察单侧梅尼埃病患者双耳的膜迷路积水状况[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2016, 30(16): 1290-1296.
- [13] 刘宇鹏,杨军,周欣. 甘油试验耳蜗电图对内淋巴囊减压术疗效预估作用的研究[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2019, 33(6): 485-488.
- [14] He B, Zhang F, Zheng H, et al. The Correlation of a 2D Volume-Referencing Endolymphatic-Hydrps Grading System With Extra-Tympanic Electrocochleography in Patients With Definite Ménière's Disease[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 595038.
- [15] Foster CA, Breeze RE. Endolymphatic hydrps in Ménière's disease: cause, consequence, or epiphenomenon? [J]. *Otol Neurotol*, 2013, 34(7): 1210-1214.
- [16] Liu Y, Pyykkö I, Naganawa S, et al. Consensus on MR Imaging of Endolymphatic Hydrps in Patients With Suspected Hydropic Ear Disease (Meniere)[J]. *Front Surg*, 2022, 9: 874971.
- [17] 许珉,陈籽辰,魏馨雨,等. 前庭诱发肌源性电位、冷热试验和耳蜗电图在梅尼埃病诊断中的评估价值[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2019, 33(8): 704-708.
- [18] Nie L, Li C, Marzani F, et al. Classification of Wideband Tympanometry by Deep Transfer Learning With Data Augmentation for Automatic Diagnosis of Otosclerosis[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2022, 26(2): 888-897.
- [19] Niemczyk E, Lachowska M, Tataj E, et al. Wideband tympanometry and absorbance measurements in otosclerotic ears[J]. *Laryngoscope*, 2019, 129(10): E365-E376.
- [20] Şahin MI, Özyürek DD, Vural A, et al. Can Wideband Tympanometry Predict the Prognosis of Otitis Media With Effusion? [J]. *J Audiol Otol*, 2022.
- [21] 潘骏良,杨军. 宽频声导抗在分泌性中耳炎诊断中的临床应用价值[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2018, 32(17): 1309-1315.
- [22] Demir E, Afacan NN, Celiker M, et al. Can Wideband Tympanometry Be Used as a Screening Test for Superior Semicircular Canal Dehiscence? [J]. *Clin Exp Otorhinolaryngol*, 2019, 12(3): 249-254.
- [23] Pieterse H, Biagio-De Jager L, Hofmeyr LM, et al. Wideband acoustic immittance in superior semicircular canal dehiscence[J]. *Auris Nasus Larynx*, 2022, 49(6): 921-927.
- [24] 李姝娜,沈敏,陈向平,等. 梅尼埃病患者宽频声导抗吸收率的特征[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2019, 33(3): 224-227.
- [25] 兰兰,黄鑫,谢林怡,等. 梅尼埃病患者的宽频声导抗测试研究[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2019, 17(6): 421-425.
- [26] Demir E, Celiker M, Aydogan E, et al. Wideband Tympanometry in Meniere's Disease[J]. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg*, 2020, 72(1): 8-13.
- [27] 刘洁,蒋雯,林欢,等. 梅尼埃病患者宽频声导抗测试特点初步研究[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2021, 35(12): 1068-1072.

# 国产人工前庭的工作原理及原型机构建<sup>\*</sup>

任鹏宇<sup>1,2</sup> 张青<sup>3</sup> 韩鹏<sup>4</sup> 徐颂华<sup>1</sup> 徐创新<sup>1</sup> 李宗芳<sup>1</sup> 杨军<sup>3</sup>

**[摘要]** **目的:**完成具有自主知识产权的国产人工前庭工作原理设计及原型机构建,并验证其工作性能,为人工前庭临床推广应用奠定基础。**方法:**在既往研究的基础上,以前庭神经系统信息编码原则为核心,构建国产多通道人工前庭的工作原理,并依据该原理进行电路设计;选择合适电子元器件以及软件系统,构建国产多通道人工前庭原型机;通过性能测试,验证该原型机的输入、输出特性。**结果:**成功设计了国产多通道人工前庭工作原理框图,并依据此框图进行了工作原理的详细阐明;依据工作原理,设计并绘制了国产多通道人工前庭电路图,并依据电路图布局将所选的电子元器件以及软件系统有机组合起来,完成国产多通道人工前庭原型机的构建;性能测试实验表明,国产多通道人工前庭原型机各个刺激电极能够输出双相脉冲电流,能够感知空间旋转运动并且依据旋转运动数据输入调制输出的脉冲电流频率。**结论:**国产多通道人工前庭工作原理及电路设计合理;国产多通道人工前庭原型机构建成功,空间旋转运动感知输入及调制脉冲电流输出稳定且可靠。

**[关键词]** 多通道人工前庭;工作原理;电路设计;原型机构建;双侧前庭病

**DOI:**10.13201/j.issn.2096-7993.2022.09.008

**[中图分类号]** R764.3 **[文献标志码]** A

## The working principle and prototype construction of the Chinese vestibular prosthesis

REN Pengyu<sup>1,2</sup> ZHANG Qing<sup>3</sup> HAN Peng<sup>4</sup> XU Songhua<sup>1</sup> XU Chuangxin<sup>1</sup>  
LI Zongfang<sup>1</sup> YANG Jun<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Medical Artificial Intelligence, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710061, China; <sup>2</sup>Department of Neurosurgery, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University; <sup>3</sup>Department of Otorhinolaryngology-Head & Neck Surgery, Xinhua Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine; Shanghai Jiaotong University School of Medicine Ear Institute; Shanghai Key Laboratory of Translational Medicine on Ear and Nose diseases; <sup>4</sup>Department of Otolaryngology-Head & Neck Surgery, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University)

Corresponding author: LI Zongfang, E-mail: zongfang\_li1@163.com; YANG Jun, E-mail: yangjun@xinhumed.com.cn

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(No:81803317,81971766,82171137);上海市科委项目(No:21S31900600);陕西省重点研发计划项目(No:2019KW-071,2020KWZ-091);中国博士后科学基金(No:2021M692577)

<sup>1</sup>西安交通大学第二附属医院医学人工智能研究院(西安,710016)

<sup>2</sup>西安交通大学第二附属医院神经外科

<sup>3</sup>上海交通大学医学院附属新华医院耳鼻咽喉-头颈外科 上海交通大学医学院耳科学研究所 上海耳鼻咽喉转化医学重点实验室

<sup>4</sup>西安交通大学医学院第一附属医院耳鼻咽喉-头颈外科

通信作者:李宗芳,E-mail:zongfang\_li1@163.com;杨军,E-mail:yangjun@xinhumed.com.cn

**引用本文:**任鹏宇,张青,韩鹏,等.国产人工前庭的工作原理及原型机构建[J].临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2022,36(9):690-697. DOI:10.13201/j.issn.2096-7993.2022.09.008.

- [28] Tanno G, Santos M, Sanches M, et al. Analysis of wideband tympanometry in Ménière's disease[J]. Braz J Otorhinolaryngol, 2022, 88(2): 194-203.
- [29] Kentala E, Viikki K, Pyykkö I, et al. Production of diagnostic rules from a neurotologic database with decision trees[J]. Ann Otol Rhinol Laryngol, 2000, 109(2): 170-176.
- [30] Cho YS, Cho K, Park CJ, et al. Automated measurement of hydrops ratio from MRI in patients with Ménière's disease using CNN-based segmentation[J].

Sci Rep, 2020, 10(1): 7003.

- [31] 杨军,郑贵亮.外周前庭疾病的诊断和治疗[J].山东大学耳鼻喉眼学报,2020,34(5):1-6.
- [32] 吴文瑾,杨军.梅尼埃病治疗的国际共识解读[J].临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2019,33(6):515-516,524.
- [33] 杨军,郑贵亮.进一步重视前庭康复[J].临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2019,33(3):204-206.

(收稿日期:2022-05-28)